

Sergio Ruiz, M.J.Soneira y Gabriel Junyent
E.T.S.I. de Telecomunicación de Barcelona (U.P.C.)

ABSTRACT

In this paper the performances introduced by a semiconductor optical amplifier in a fiber optical digital communication system are analyzed. The device is used as repeater as well as pre-amplifier at the photodetector input (PIN photodiode). It is shown that spontaneous emission and the number of repeaters give an upper limit for the quantum efficiency of the photodetector (which is a decisive parameter in the signal to noise ratio).

INTRODUCCION

El uso del amplificador óptico semiconductor en sistemas de transmisión digital por fibra óptica ofrece grandes posibilidades. Diferentes estudios demuestran que su utilización como preamplificador y como amplificador en línea puede mejorar las prestaciones del receptor [1],[2],[3].

Se entiende por amplificador óptico un dispositivo que, utilizando efecto laser, permite amplificar la luz sin alterar su frecuencia y fase (coherencia). Esto no se consigue totalmente debido al fenómeno de emisión espontánea, el cual incorpora un ruido (ruido cuántico) de estadística muy compleja.

Para caracterizar el amplificador óptico se ha utilizado un modelo desarrollado por los autores en otros trabajos que permite también caracterizar el fotodetector considerándolo como un caso particular de dicho modelo [4],[5]. Queda caracterizado, por tanto, el sistema completo formado por el emisor, la cadena de amplificadores ópticos y la etapa receptora.

Se utilizan métodos asintóticos y ciertas aproximaciones para evaluar la influencia de los parámetros del amplificador óptico, actuando como previo, y del número de etapas repetidoras empleadas.

En primer lugar, se establece el concepto de relación señal/ruido a la salida de un fotodetector en un sistema de transmisión digital por fibra óptica. A continuación, se comparan las relaciones señal/ruido obtenidas con y sin preamplificador óptico para estudiar la influencia del mismo en el rendimiento cuántico del fotodetector. Se tiene también en cuenta el número de amplificadores ópticos empleados en el enlace.

Finalmente se obtiene, como conclusión, que tanto la emisión espontánea como el número de etapas repetidoras empleadas limitan el valor del rendimiento cuántico del fotodetector.

DETERMINACION DE LA RELACION SEÑAL/RUIDO DE UN FOTODETECTOR

Antes de definir la relación señal/ruido para un sistema de detección donde la información es esencialmente presencia o ausencia de señal, es necesario dar una definición precisa de los términos señal y ruido.

En este trabajo se considera un sistema

receptor que consta de un amplificador óptico semiconductor seguido de un fotodiodo y se compara con el mismo sistema sin amplificador. Se consideran también las etapas repetidoras del enlace. El receptor viene representado en la figura 1.

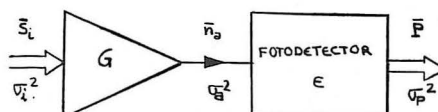


Fig.1

Tres son las fuentes de ruido que se contemplan: ruido superpuesto a la señal información, entrada del preamplificador óptico, emisión espontánea amplificada (inherente al efecto laser) y ruido shot del fotodetector. Tal como se muestra en la figura 1, llamaremos

$$\bar{S}_i = \bar{S} + \bar{n} \quad (1)$$

al número medio de fotones a la entrada del preamplificador, siendo \bar{S} el número medio de fotones de señal y \bar{n} el de ruido. Definimos la salida del fotodetector como

$$P = S + n_o \quad (2)$$

donde $S = G\bar{S}$ es la componente de señal de dicha salida, G es la ganancia del preamplificador y E es el rendimiento cuántico del fotodetector; n_o es la componente de ruido cuyo valor cuadrático medio se puede expresar como:

$$(\overline{n_o})^2 = (\overline{P - S})^2 = (\sigma_P)^2 + (\bar{P} - \bar{S})^2 \quad (3)$$

siendo σ_P la desviación típica de la señal total de salida y \bar{P} su valor medio.

La media y la varianza, (\bar{n}_a) y $(\sigma_a)^2$ respectivamente, a la salida del preamplificador óptico, se pueden expresar como:

$$\bar{n}_a = G\bar{S}_i + (G-1)[c/(a-b)] \quad (4)$$

$$(\sigma_a)^2 = G^2((\sigma_{S_i})^2 - \bar{S}_i) + G\bar{S}_i(1+2(G-1)[a/(a-b)]) + (G-1)(1+(G-1)[a/(a-b)])[c/(a-b)] \quad (5)$$

donde a, b y c son, respectivamente, los parámetros de emisión estimulada, absorción y emisión espontánea del preamplificador óptico y $(\sigma_{S_i})^2$ es la varianza de la señal de entrada. Estas expresiones se han obtenido utilizando una

caracterización estadística para el amplificador óptico basada en la teoría STI [6].

Considerando el fotodetector como un amplificador con parámetros de emisión estimulada y espontánea nulos, puede caracterizarse también utilizando la teoría STI. Se obtienen entonces las siguientes expresiones para la media y la varianza a su salida:

$$\bar{P} = G\bar{S}_i + (G-1)\epsilon[c/(a-b)] + \bar{d} \quad (6)$$

$$(\sigma_P)^2 = (G\epsilon)^2((\sigma_i)^2 - \bar{S}_i) + G\bar{S}_i(1+2(G-1)\epsilon[a/(a-b)]) + (G-1)\epsilon(1+(G-1)\epsilon[a/(a-b)])(c/(a-b)) + (\sigma_d)^2 \quad (7)$$

donde \bar{d} y $(\sigma_d)^2$ son, respectivamente, la media y la varianza del ruido shot debido a la corriente de oscuridad del fotodetector.

Es usual definir la relación señal/ruido como el cociente entre la media de señal al cuadrado dividida por su varianza. De la expresión (3) se observa que un término adicional de ruido lo constituye el segundo sumando de esta expresión. Es fácil demostrar que

$$\bar{P} - S = G\bar{n} + (G-1)\epsilon[c/(a-b)] + \bar{d} \quad (8)$$

El primer sumando del segundo miembro de (8) proviene del ruido a la entrada del preamplificador. El segundo corresponde a la emisión espontánea amplificada y el tercero es, claramente, el ruido shot generado por la corriente de oscuridad del fotodetector. En una situación ideal en la que estas tres componentes de ruido no existieran, se puede demostrar que la varianza $(\sigma_P)^2$ toma el valor

$$(\sigma_P)^2 = (G\epsilon)^2(\sigma_m)^2 \quad (9)$$

siendo σ_m la desviación típica de la componente de señal a la entrada del preamplificador. Este último resultado era de esperar.

Una vez analizadas las distintas componentes de ruido que intervienen, podemos ya expresar la relación señal/ruido a la salida del fotodetector como:

$$S/N|_{OUT} = (\bar{S}\epsilon G)^2 / ((\sigma_P)^2 + (\bar{P}-S)^2) \quad (10)$$

Fácilmente se puede comprobar que esta última expresión, para la situación ideal mencionada anteriormente, toma el valor

$$S/N|_{OUT} = \bar{S}^2 / (\sigma_m)^2 \quad (11)$$

INFLUENCIA DEL AMPLIFICADOR OPTICO EN EL RENDIMIENTO CUANTICO DEL FOTODETECTOR

El amplificador óptico puede utilizarse como amplificador en línea y como preamplificador. Analizaremos primero la influencia del preamplificador en el rendimiento cuántico del fotodetector sin considerar todavía el efecto del conjunto de etapas repetidoras. Por razones de simplicidad matemática se emplea el concepto ruido/señal en lugar del habitual señal/ruido.

La relación ruido/señal a la salida del Fotodetector, con el preamplificador óptico incorporado, se puede expresar como:

$$R_1 = \frac{(\sigma_i)^2 - \bar{S}_i}{\bar{S}^2} + \frac{\bar{S}_i(1+2(G-1)\epsilon[a/(a-b)])}{G\bar{S}} + \dots$$

$$+ \frac{(G-1)\epsilon(1+(G-1)\epsilon[a/(a-b)])(c/(a-b)) + (\sigma_d)^2}{(G\bar{S})^2} + \frac{(G\bar{n} + (G-1)\epsilon[c/(a-b)] + \bar{d})^2}{(G\bar{S})^2} \quad (12)$$

Si no se emplea preamplificador óptico la fórmula anterior se puede aplicar particularizándola para $G=1$ y $c=0$. Sea R_m la relación ruido/señal en ausencia de preamplificador. Resulta entonces

$$R_m = \frac{(\sigma_i)^2 - \bar{S}_i}{\bar{S}^2} + \frac{\bar{S}_i}{\bar{S}} + \frac{(\sigma_d)^2 + (\bar{n} + \bar{d})^2}{(\bar{S})^2} \quad (13)$$

Obviamente, será de utilidad el preamplificador óptico siempre que se verifique

$$R_1 < R_m \quad (14)$$

Resolviendo esta inecuación y teniendo en cuenta que $G>1$, se obtiene la siguiente condición:

$$(G+1)[(a-b)/a][(\sigma_d)^2 + \bar{d}^2] + \epsilon\{G[(a-b)/a](\bar{S} + \bar{n}(1+2\bar{d})) - c/a(2\bar{d}+1)\} - \epsilon^2\{2G(\bar{S} + \bar{n}(1+c/a)) + (G-1)(1+c/a)c/(a-b)\} > 0 \quad (15)$$

Los autores han demostrado que R_1 es una función decreciente con la ganancia del preamplificador [7]. Por tanto, la condición expresada se verificará a partir de una cierta ganancia mínima. Una situación idónea se tendrá para altos valores de G . Resolviendo (15) para este caso se obtiene la siguiente inecuación:

$$((\sigma_d)^2 + \bar{d}^2)[(a-b)/a] + \epsilon(\bar{S} + \bar{n}(1+2\bar{d}))[a-b]/a - \epsilon^2\{2(\bar{S} + \bar{n}(1+c/a)) + (1+c/a)c/(a-b)\} > 0 \quad (16)$$

Esta desigualdad sólo es posible si ϵ está acotado por el valor

$$\epsilon_c = \frac{A + \sqrt{B}}{C} \quad (17)$$

siendo:

$$A = \bar{S} + \bar{n}(1+2\bar{d}) \quad (17.a)$$

$$B = (\bar{S} + \bar{n}(1+2\bar{d}))^2 + 4((\sigma_d)^2 + \bar{d}^2)[a/(a-b)]\{2(\bar{S} + \bar{n}(1+c/a)) + (1+c/a)c/(a-b)\} \quad (17.b)$$

$$C = 2[a/(a-b)]\{2(\bar{S} + \bar{n}(1+c/a)) + (1+c/a)c/(a-b)\} \quad (17.c)$$

Consideremos el caso ideal en el cual no hubiese ruido a la entrada del preamplificador ($\bar{n}=0$) ni existiese ruido shot en el fotodetector. La cota obtenida en (17) toma el siguiente valor:

$$\epsilon_c = (\bar{S} + \bar{n}) / \{[a/(a-b)]\{2(\bar{S} + \bar{n}(1+c/a)) + (1+c/a)c/(a-b)\}\} \quad (18)$$

Se observa claramente como el valor de la cota del rendimiento cuántico disminuye al aumentar la emisión espontánea. Si esta fuese despreciable obtendríamos:

$$\epsilon_{max} = (a-b)/2a \quad (19)$$

En la mejor de las situaciones el coeficiente de absorción del preamplificador óptico será nulo ($b=0$), de lo cual se deduce que el rendimiento cuántico no podrá, en ningún caso, ser superior al 50%.

Una vez analizada la influencia del preamplificador sobre el rendimiento cuántico, consideraremos el efecto que sobre el mismo tiene el número de etapas repetidoras utilizadas en el enlace.

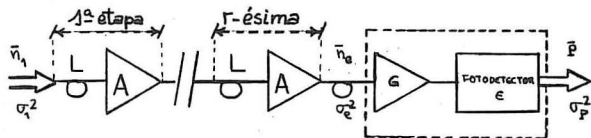


Fig.2

Llamaremos \bar{n}_1 y $(\sigma_1)^2$ a la media y varianza, respectivamente, de la entrada al sistema (Fig. 2). La media y la varianza al final de una cadena de r amplificadores ópticos idénticos, (incluyendo el último tramo de fibra amplificador-preamplificador), se pueden expresar como:

$$\bar{n}_0 = L\bar{n}_1 + rK(1-L) \quad (20)$$

$$(\sigma_0)^2 = L^2(\sigma_1)^2 + L\bar{n}_1(1-L)(2Kr+1) + Kr(1-L)(1+Kr(1-L)) \quad (21)$$

donde L es la atenuación de una sección de fibra y K es un factor que depende de los parámetros del amplificador óptico. Se ha tenido en cuenta que, usualmente, la finalidad de la ganancia del amplificador puesto en línea es la de compensar exactamente las pérdidas introducidas por la fibra en cada sección.

En (20) se ve claramente como el valor medio del número de fotones a la entrada del preamplificador consta de dos términos: $L\bar{n}_1$ corresponde a la componente de señal, mientras que $r(1-L)K$ incluye la emisión espontánea acumulada a lo largo de las r etapas.

Con la definición de relación señal/ruido dada en (10), podemos expresar la relación ruido/señal a la salida del fotodetector teniendo en cuenta el efecto de los r repetidores y del preamplificador óptico. Basta para ello sustituir en (12) el valor de \bar{n} por el de $r(1-L)K$ y el valor de \bar{s} por $L\bar{n}_1$. Haciendo las mismas sustituciones en (13), se obtiene la relación ruido/señal sin tener en cuenta el preamplificador óptico. Imponiendo que la primera de estas relaciones sea menor que la segunda, se ha obtenido una cota para el rendimiento cuántico del fotodetector que depende del número de repetidores empleados. Su expresión es la siguiente:

$$\epsilon_c = \frac{A + \sqrt{B}}{C} \quad (22)$$

siendo:

$$A = L\bar{n}_1 + Kr(1-L)(1+2\bar{d}) \quad (22.a)$$

$$B = (L\bar{n}_1 + Kr(1-L)(1+2\bar{d}))^2 + 4((\sigma_0)^2 + \bar{d}^2) [a/(a-b)][2(L\bar{n}_1 + Kr(1-L)(1+c/a)) + (1+c/a)[c/(a-b)]] \quad (22.b)$$

$$C = 2[a/(a-b)][2(L\bar{n}_1 + Kr(1-L)(1+c/a)) + (1+c/a)[c/(a-b)]] \quad (22.c)$$

Esta cota es tanto menor cuanto mayor sea el valor de r , hasta alcanzar un valor asintótico cuando r es muy elevado. Bajo ciertas condiciones ideales (emisión espontánea del preamplificador despreciable y ausencia de

corriente de oscuridad), se puede demostrar que esta cota para el rendimiento cuántico toma el valor:

$$\epsilon_{cmax} = (a-b)/4a \quad (23)$$

donde a y b son, respectivamente, los parámetros de emisión estimulada y de absorción del preamplificador óptico. Para un valor despreciable de este último parámetro, se observa claramente como el rendimiento cuántico no debe ser mayor del 25%.

CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio de las prestaciones que introduce un amplificador óptico semiconductor en un enlace digital por fibra óptica. Para ello se ha calculado la relación señal/ruido a la salida del fotodetector, demostrándose analíticamente que la emisión espontánea degrada esa relación.

Ha sido estudiado el comportamiento del amplificador óptico operando como previo a la entrada del fotodetector y como amplificador de línea en una cadena de repetidores. En el primer caso se ha deducido que su ganancia mejora la relación señal/ruido final a condición de limitar el valor del rendimiento cuántico del fotodiodo a valores nunca superiores a 0,5. Colocando en línea un conjunto de amplificadores ópticos se observa cómo las limitaciones en el valor del rendimiento cuántico son aún más severas. Para un número elevado de etapas repetidoras se han obtenido cotas máximas del orden del 25% para dicho rendimiento. Se ha podido calcular, por otra parte, el número máximo de repetidores ópticos que puede emplearse para una determinada probabilidad de error quedando, por tanto, fijada la longitud máxima del enlace.

REFERENCIAS

- [1] G.Zeidler and D.Schicketanz, "Use of laser amplifiers in a glass-fiber communication system", Siemens Forsch. Entwickl.-Ber.Bd.2 (1973)Nr.4.
- [2] Personick, S.D.: "Applications for quantum amplifiers in simple digital optic communication systems", Bell Syst. Tech. J., 1973, 52, p.p 117-133.
- [3] Y. Yamamoto and H. Tsuchiya, "Optical receiver sensitivity improvement by semiconductor laser preamplifier", Electronics Letters, March 1980, Vol.16 No. 6.
- [4] J.R. Usandizaga. Proyecto Fin de Carrera: "Caracterización y modelo estadístico de un laser amplificador semiconductor en transmisión digital por fibra óptica". E.T.S.I. de Telecomunicación de Barcelona (U.P.C.), 1985.
- [5] Sergio Ruiz, J.R. Usandizaga y G. Junyent, "Modelo estadístico del laser amplificador en un sistema de transmisión digital por fibra óptica monomodo", II J.E.M., Madrid, Febrero 1986.
- [6] K. Shimoda, H. Takahashi and C.H. Townes, "Fluctuations in amplification of quanta with application to maser amplifiers", J. Phys. Soc. Japan, Vol.12, p.p. 686-700, 1957.
- [7] M.J. Soneira. Proyecto Fin de Carrera: "El amplificador óptico en transmisión digital por fibra óptica: estudio de sus prestaciones como preamplificador y como amplificador de línea" E.T.S.I. de Telecomunicación de Barcelona (U.P.C.), 1986.